

5 Étude des processus d'émission des pions

Dans ce chapitre nous allons utiliser les résultats des mesures que nous avons obtenues pour étudier les sources d'émission des pions. Cette étude est basée sur l'utilisation des modèles NEXUS et RQMD présentés dans le chapitre 2. Dans un premier temps, nous motiverons notre étude en précisant l'influence de l'interaction coulombienne sur les pions créés dans les deux modèles. Nous comparerons ensuite leurs prédictions aux résultats expérimentaux que nous avons obtenus.

5.1 Pions et interaction coulombienne dans les modèles NEXUS et RQMD

Avant d'étudier le comportement des pions vis-à-vis de l'interaction coulombienne, nous allons détailler les différentes sources de pions afin de comprendre l'évolution temporelle de l'émission des pions dans les modèles.

5.1.1 Les sources de pions

Dans ce paragraphe nous allons préciser la contribution des différentes sources de pions que nous avons présentées dans le paragraphe 2.2.2. Nous les avons schématiquement classées en quatre catégories : les collisions entre hadrons, les désintégrations de résonances baryoniques (Δ , nucléons excités, ...), les désintégrations de résonances mésoniques (ρ , ω , η , ...), et les désintégrations de gouttelettes de quarks dans le cadre de NEXUS. Nous avons représenté sur la figure 5.1 pour NEXUS et 5.2 pour RQMD, les distributions du temps d'émission des pions en fonction de la source qui les émet.

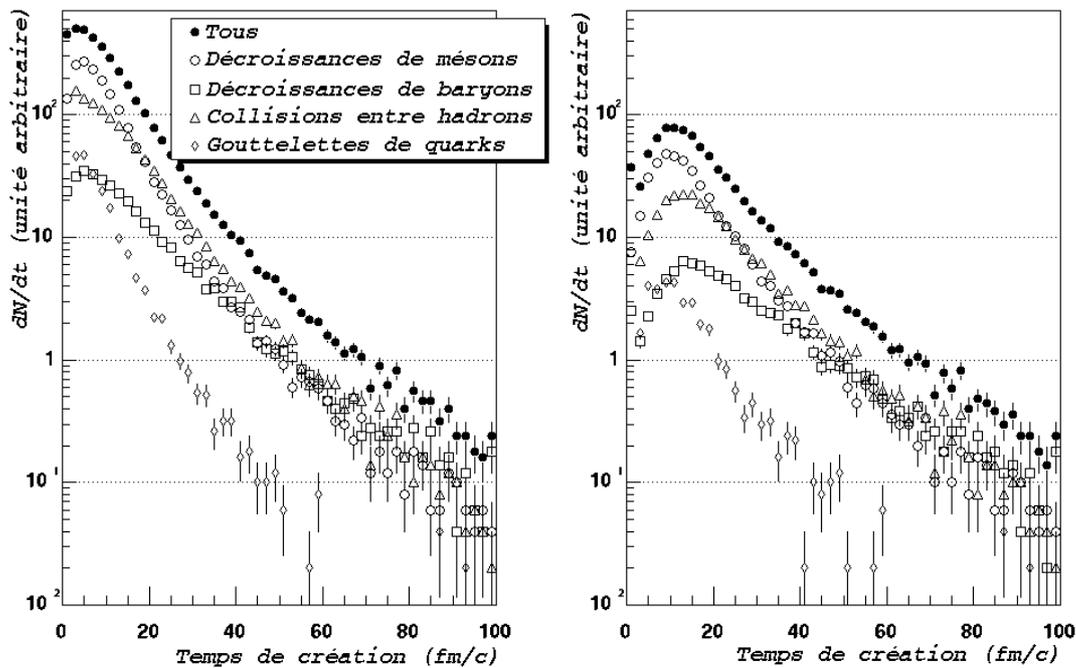


Figure 5.1 Temps de création des π^+ dans le modèle NEXUS. A droite : tous les pions créés. A gauche : seulement les pions qui ne sont pas réabsorbés.

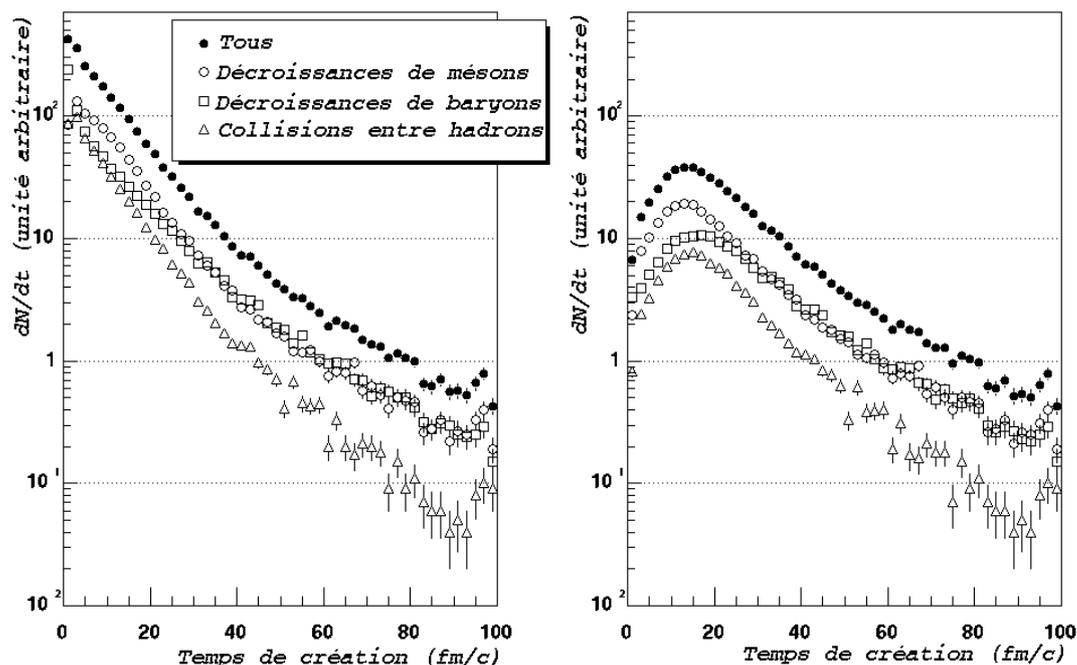


Figure 5.2 Temps de création des π^+ dans le modèle RQMD. A droite : tous les pions créés. A gauche : seulement les pions qui ne sont pas réabsorbés.

Ces figures sont séparées en deux parties : la première correspond au temps de création de tous les pions alors que la seconde est construite uniquement à partir des pions qui échappent au système. Seuls ces derniers seront mesurés. Dans les deux modèles les pions sont créés dans leur très grande majorité, avant 20 fm/c. Cependant la valeur la plus probable du temps de création des pions qui échappent au système se situent autour de 15 fm/c. Les pions qui sont créés avant 15 fm/c sont réabsorbés dans la grande majorité des cas.

Dans le cadre du modèle NEXUS, la désintégration des gouttelettes de quarks contribuent de manière significative à la création de pions jusqu'à 15 fm/c. Ensuite, leur contribution est extrêmement réduite par rapport aux autres. Les pions issus des gouttelettes sont alors réabsorbés dans leur grande majorité. Dans NEXUS, les pions sont donc émis principalement à partir de sources hadroniques.

Dans les deux modèles la source dominante de pions est la désintégration des résonances mésoniques. En effet, les collisions entre hadrons libèrent en général suffisamment d'énergie pour entraîner la formation de particules de masse importante. Les particules ainsi formées sont instables et un grand nombre d'entre elles se désintègrent en produisant des pions au bout de quelques fm/c. Ces résonances ont tendance à retarder le temps d'émission des pions.

Les deux modèles prédisent des temps d'émission des pions similaires. Sur la figure 5.3, nous avons comparé les temps de création des pions qui échappent au système. Les deux modèles sont en très bon accord pour les temps de création supérieurs à 20 fm/c. Ils prédisent aussi tous les deux que la valeur la plus probable du temps de création des pions

se situe autour de 15 fm/c. Cependant, le modèle RQMD prédit une émission plus importante que le modèle NEXUS avant 15 fm/c. Cette différence peut s'expliquer par la présence des gouttelettes de quarks dans NEXUS qui tend à limiter l'émission de particules pendant les 10 premiers fm/c. Par la suite, cette différence est compensée par une émission plus importante de pions au niveau de la valeur la plus probable.

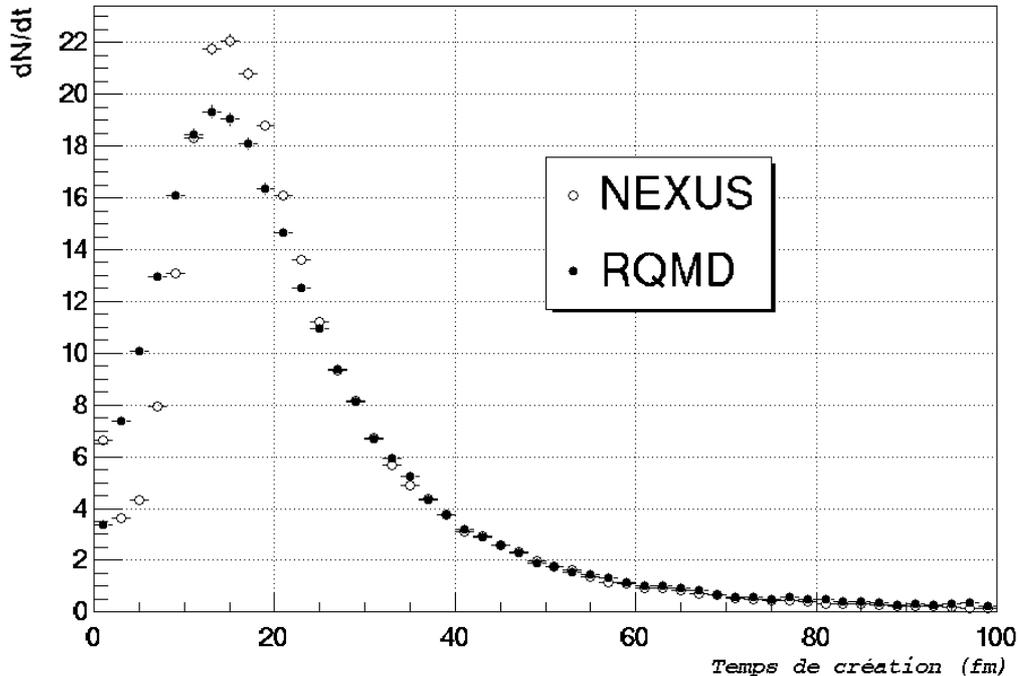


Figure 5.3 Temps de création des pions qui ne sont pas réabsorbés.

Les pions issus des gouttelettes de quarks ne sont pas détectés dans leur très grande majorité car ils sont réabsorbés dans des interactions hadroniques. Cependant, la présence des gouttelettes a un impact sur la distribution du temps d'émission des pions : elles limitent l'émission de pions avant 10 fm/c. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier les conséquences de l'insertion de l'interaction coulombienne dans les modèles NEXUS et RQMD.

5.1.2 L'interaction coulombienne dans les modèles

Cette étude est basée sur l'utilisation de la méthode de calcul non quantique, relativiste que nous avons présentée au paragraphe 2.3.2.3 Elle présente l'avantage de permettre une étude à n-corps. Toutes les particules chargées présentes dans le système à un instant donné sont prises en compte. En outre le calcul classique ne nécessite pas d'ajuster un paramètre qui représente la valeur de la charge positive en excès comme dans le cas du calcul quantique. Cette méthode possède donc un pouvoir prédictif.

Dans le cadre de notre étude, l'interaction coulombienne se traduit par deux effets mesurables : l'attraction mutuelle des pions de charge opposée qui est étudiée en construisant la fonction de corrélation $\pi^- - \pi^+$, et la distorsion des spectres en masse transverse due à la présence des protons en excès dans le système. Le premier effet dépend

principalement de la différence entre les vitesses et les positions spatio-temporelles des pions au moment de leur création. La présence d'une "charge centrale" peut affecter la fonction de corrélation car elle modifie les spectres en impulsion relative. Cependant le calcul classique de l'interaction coulombienne montre que cette influence est faible dans les collisions Pb+Pb à 17.3 AGeV dans le centre de masse ce qui n'est pas le cas dans les collisions à plus basse énergie. La fonction de corrélation $\pi^- - \pi^+$ permet de sonder la distance relative entre les pions au moment de leur création. Sur la figure 5.4, nous avons comparé les prédictions des modèles NEXUS et RQMD.

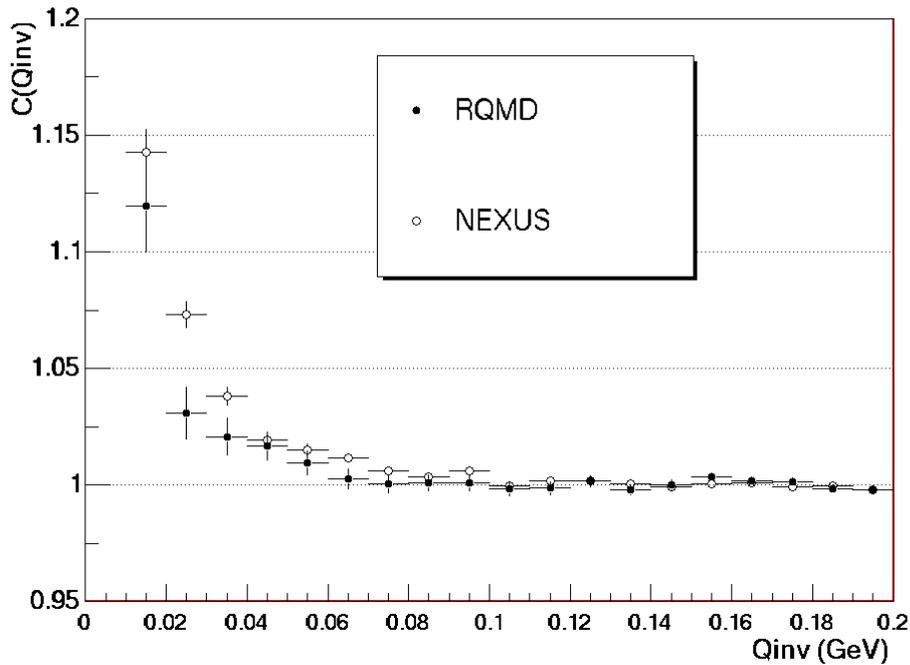


Figure 5.4 Fonctions de corrélation $\pi^- - \pi^+$ calculées à partir des modèles NEXUS et RQMD avec la méthode de calcul quantique de l'interaction coulombienne

NEXUS prédit une corrélation un peu plus importante que RQMD, ce qui implique que la distance spatio-temporelle séparant les pions au moment de leur création y est plus faible. Ce phénomène pourrait être expliqué à partir de la figure qui présente la distribution des temps d'émission des pions. Elle est en effet moins dispersée dans le cas de NEXUS que de RQMD. Cependant, le temps de création ne peut être directement relié à la fonction de corrélation car il existe une forte corrélation entre l'impulsion et la position des pions au moment de leur création. Deux particules d'impulsion proche ont alors tendance à être créées à proximité l'une de l'autre dans le temps et l'espace. La distance spatio-temporelle qui les sépare est ainsi réduite. La fonction de corrélation est ainsi fortement affectée par les phénomènes dynamiques.

Le rapport π^-/π^+ en fonction de la masse transverse permet quant à lui d'étudier la distorsion des impulsions des pions causée par la présence d'un excès de proton par rapport aux anti-protons à leur voisinage. La collaboration NA49 a mesuré le pouvoir d'arrêt des protons dans les collisions Pb+Pb à 17.3 AGeV. Au niveau de la rapidité du centre de masse, 19 protons en excès sont mesurés par unité de rapidité. Le modèle NEXUS en prédit

24 et le modèle RQMD 28. Dans les deux cas, ils surestiment la charge présente en excès dans le système au niveau de la rapidité du centre de masse. L'impact de l'interaction entre les pions et la "charge centrale" devrait donc être surestimé par ces modèles. Nous garderons ce point à l'esprit lorsque nous comparerons leurs prédictions aux données.

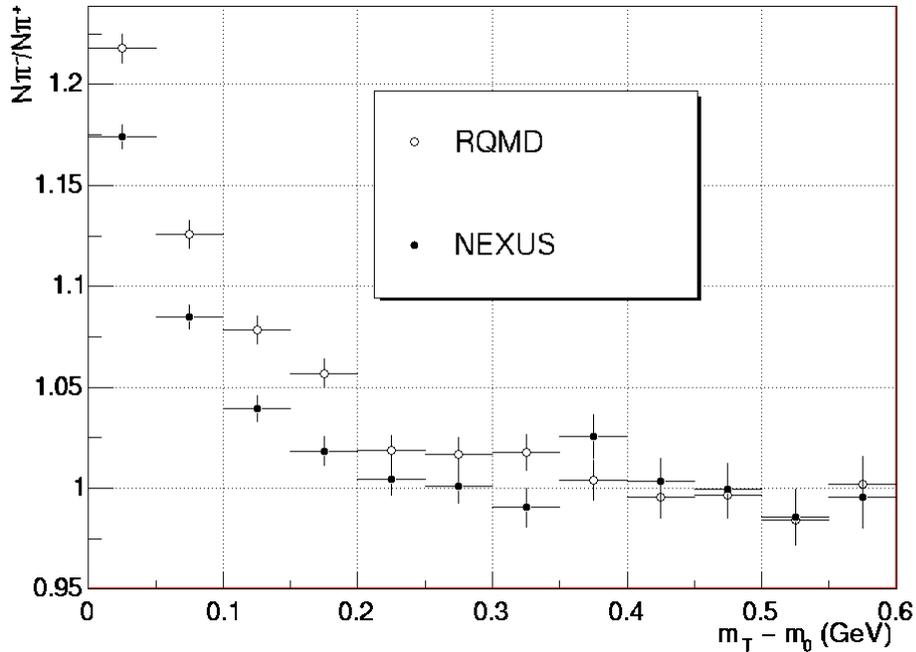


Figure 5.5 Rapport π^-/π^+ en fonction de m_T prédit par les modèles NEXUS et RQMD

Sur la figure 5.5 nous avons représenté les rapports calculés à l'aide de la méthode classique à partir des modèles NEXUS et RQMD. NEXUS atteint 1.175 pour m_T inférieure à 50 MeV alors que RQMD prédit une valeur maximum de 1.24. Un effet coulombien plus important est extrait de RQMD.

Cette différence est principalement liée à la présence dans NEXUS, des gouttelettes qui limitent très fortement l'émission des pions à partir des zones où la densité de particules est élevée. L'interaction coulombienne due à l'effet de l'excès de protons est maximum dans ces zones qui correspondent aux premiers instants de la collision lorsque la distance entre les particules est faible. Les pions créés avant 10 fm/c qui échappent au système sont alors très fortement affectés par l'interaction coulombienne. La figure 5.6 illustre ce phénomène. Elle représente $p_T(\text{coulomb}) - p_T(\text{création})$ en fonction du temps de création des pions. L'effet de l'interaction coulombienne est important pendant les 15 premiers fm/c dans le cas de RQMD. Par contre, il est moins marqué dans le cas de NEXUS.

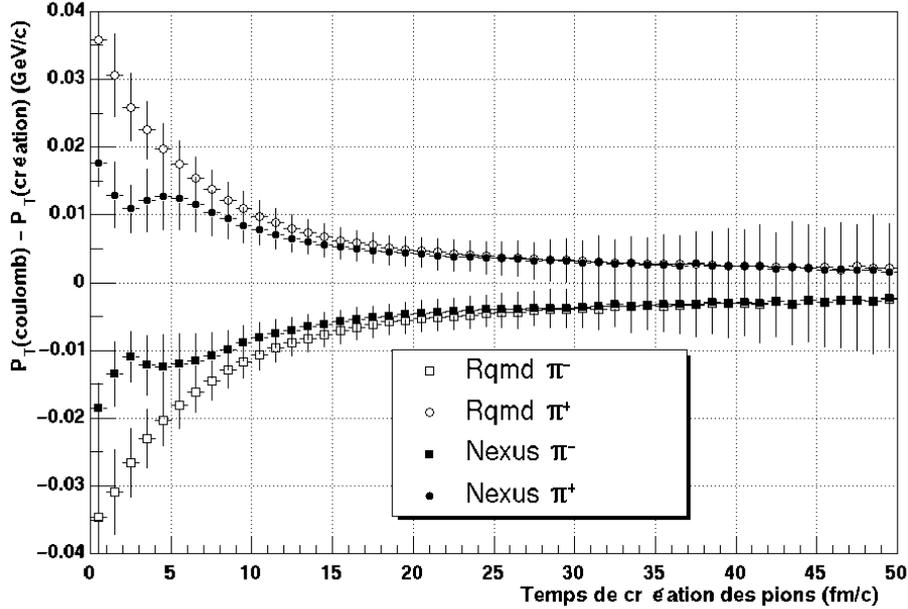


Figure 5.6 Variation d'impulsion transverse due à l'impulsion coulombienne en fonction du temps de création des pions

Une partie de la différence entre les prédictions des modèles est artificielle. En effet, nous considérons la charge des gouttelettes de grande taille (plus de 9 quarks d'une saveur donnée, u, d, s ou c) comme nulle. Le traitement de tels objets nécessiterait d'utiliser une distribution de charge répartie sur un volume ce qui complique fortement les calculs. Les particules situées à l'extérieur de la gouttelette sont soumises à une charge très inférieure à celle qui devrait normalement être considérée. Cependant, cette approximation présente un impact très limité car très peu de particules sont situées à l'extérieur des gouttelettes de grandes tailles. En effet, dans NEXUS, après la première phase de la collision, le système est pratiquement entièrement contenu à l'intérieur d'une seule gouttelette. De plus, la durée de vie des gouttelettes est de l'ordre de quelques fm/c ce qui limite fortement leurs contributions. La remontée de la variation d'impulsion transverse autour de 2–3 fm/c correspond à la désintégration des gouttelettes de grandes tailles.

Les pions qui sont créés avant 15 fm/c sont donc responsables de la différence entre les rapports π^-/π^+ prédits par RQMD et NEXUS. Les gouttelettes ont donc pour conséquence de limiter l'effet de l'interaction coulombienne car elles ne permettent pas à celle-ci de se développer lorsque les distances entre les particules sont faibles c'est-à-dire lorsque l'effet est maximal.

Nous avons donc mis en évidence une différence entre les modèles NEXUS et RQMD qui s'explique par le fait que NEXUS utilise une modélisation en terme de gouttelettes de quarks pour décrire les zones de haute densité de particules. Dans la suite de ce chapitre, nous allons comparer nos résultats expérimentaux aux données pour tenter de valider l'un des deux modèles. Il est cependant important de noter que la différence entre les deux prédictions reste limitée. En effet, l'impact des gouttelettes de quarks n'est important que pendant les 10 premiers fm/c de la collision alors que la majorité des pions sont émis à

partir de 15 fm/c.

5.2 Comparaisons entre prédictions des modèles et résultats expérimentaux

5.2.1 Principe de l'étude

La comparaison des données et des prédictions des modèles nécessite deux étapes que nous avons présentées au paragraphe 2.3. Le calcul de l'interaction coulombienne est réalisé à partir des positions et des impulsions des particules issues des générateurs d'événements. Certaines corrections dues au filtre expérimental sont ensuite appliquées. Elles sont de deux natures :

- Une sélection en acceptance qui permet de ne conserver que les particules potentiellement détectables par les spectromètres de l'expérience WA98.
- Résolution en impulsion : dans le cas de la fonction de corrélation, l'estimation de la résolution sur Q_{inv} est utilisée. La résolution sur m_T est prise en compte pour construire le rapport π^-/π^+ .

Par ailleurs les prédictions des modèles sont comparées avec les données pour lesquelles les effets d'impureté des pions ont été corrigés. Cette correction a été directement appliquée sur les données afin de montrer explicitement les erreurs systématiques dues aux différentes prédictions concernant le nombre de pions issus de particules étranges.

5.2.2 La fonction de corrélation $\pi^- - \pi^+$

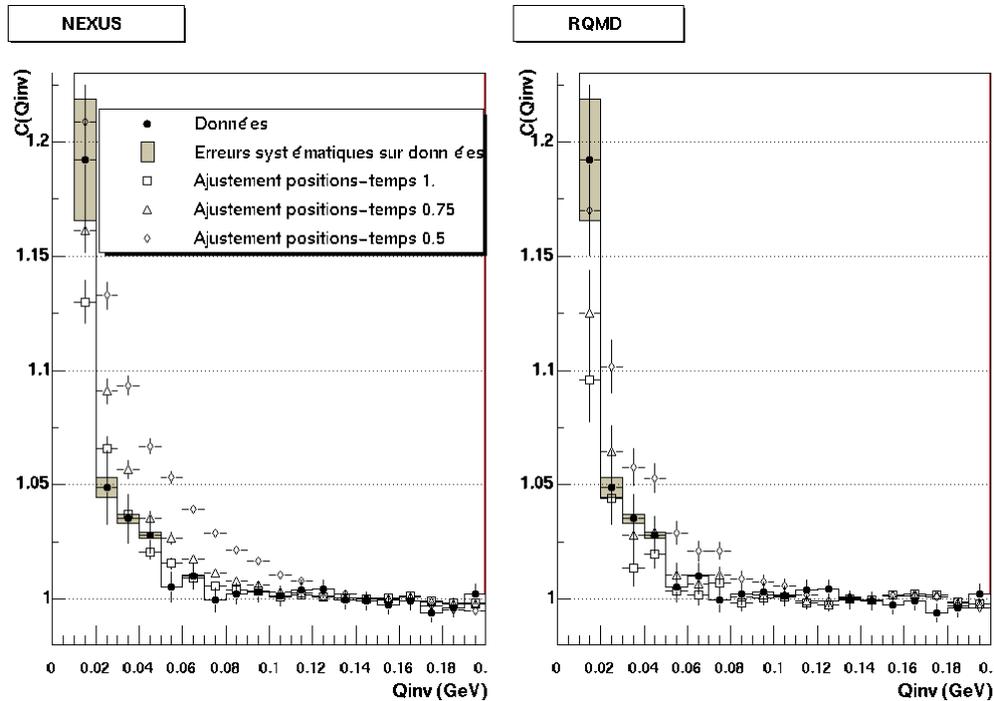


Figure 5.7 Comparaison entre la fonction de corrélation $\pi^- - \pi^+$ mesurée et les prédictions des modèles NEXUS et RQMD.

La figure 5.7 représente une comparaison entre les fonctions de corrélation mesurées et

celles extraites des modèles. Afin de vérifier la dépendance de la fonction de corrélation en fonction des positions spatio-temporelles d'émission des pions, nous avons effectué trois calculs différents pour chaque modèle : le premier à partir des positions issues des modèles ; les deux autres calculs ont été effectués en multipliant toutes les coordonnées d'espace et de temps par un facteur 0.75 et 0.5. La taille de la source est ainsi fortement réduite par rapport aux prédictions originales des modèles.

La comparaison avec les modèles nous permet de constater que NEXUS est plutôt en bon accord avec les données. Les fonctions de corrélation obtenues en réduisant la taille de la source d'émission des pions surestiment toutes les deux la fonction de corrélation expérimentale. En revanche, RQMD la sous-estime. Elle est mieux reproduite lorsque les positions spatio-temporelles de création des pions sont multipliées par le facteur 0.75. De telles conclusions sur RQMD ont aussi été tirées par les collaborations NA44 à partir de l'étude des fonctions de corrélation $\pi^- - \pi^-$ et $\pi^+ - \pi^+$ et par la collaboration NA49 en étudiant la fonction de corrélation $\pi^- - \pi^+$. Dans les deux cas la distance mesurée entre les pions est environ 70% plus petite que dans le modèle RQMD.

La modification des positions et temps d'émission des pions permet de mettre en évidence le fait que NEXUS contrairement à RQMD reproduit la fonction de corrélation expérimentale. La dynamique de la collision est donc mal prise en compte dans RQMD. Dans le paragraphe suivant nous allons étudier le rapport π^-/π^+ en fonction de la masse transverse qui est aussi sensible à la distribution des positions et temps de création des pions. Nous allons de nouveau confronter les prédictions des modèles aux résultats expérimentaux.

5.2.3 Rapport des distributions en masse transverse π^- sur π^+

Nous avons montré au paragraphe 4.4 que la désintégration des baryons et anti-baryons étranges contribue de manière significative à l'excès de π^- par rapport aux π^+ à basse masse transverse. Sur la figure 5.8, nous avons combiné ces deux effets : la désintégration des baryons étranges et l'interaction coulombienne. Le modèle NEXUS est alors en accord avec les données alors que RQMD les surestime. En effet, nous avons constaté (figure 4.20) qu'il reproduisait les données à partir des seules désintégrations de (anti-)baryons étranges. L'ajout de l'effet coulombien le conduit alors à surestimer les données. Dans le cas de NEXUS, l'effet de l'interaction coulombienne comble par contre la différence qui existait entre les données et le rapport extrait à partir des seules désintégrations d'hypérons étranges.

Dans les modèles, la présence des protons arrêtés au niveau de la rapidité du centre de masse implique la présence d'un excès de charge positive qui affecte les spectres en impulsion des pions. Il est donc justifié de comparer les modèles aux données en effectuant la somme des effets dus à l'interaction coulombienne et aux désintégrations de particules étranges. Toutefois il est utile de les analyser séparément. Sur la figure 4.24, nous avons extrait la zone où un effet coulombien peut être présent. Cette zone a été extraite à partir de NEXUS qui prédit une contribution des désintégration de baryons étranges significativement inférieure aux données. Sur la figure 5.9, nous avons alors comparer cette

zone avec les prédictions des modèles en ne prenant en compte que l'effet de l'interaction coulombienne sur les pions primaires.

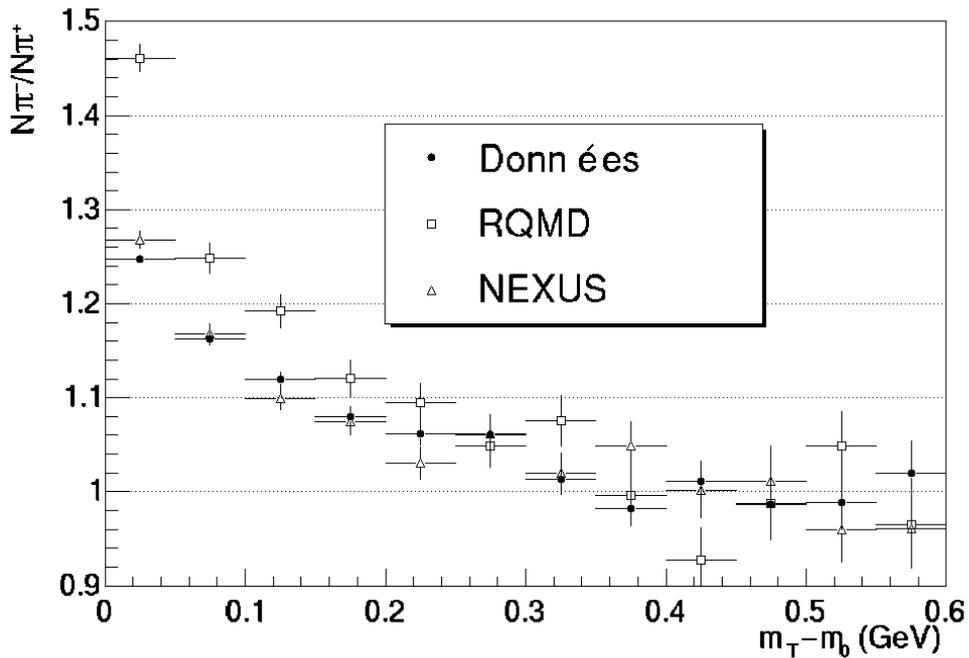


Figure 5.8 Comparaison entre les données et les modèles. Le rapport issu des modèles inclut les désintégrations de particules étranges et l'effet de l'interaction coulombienne.

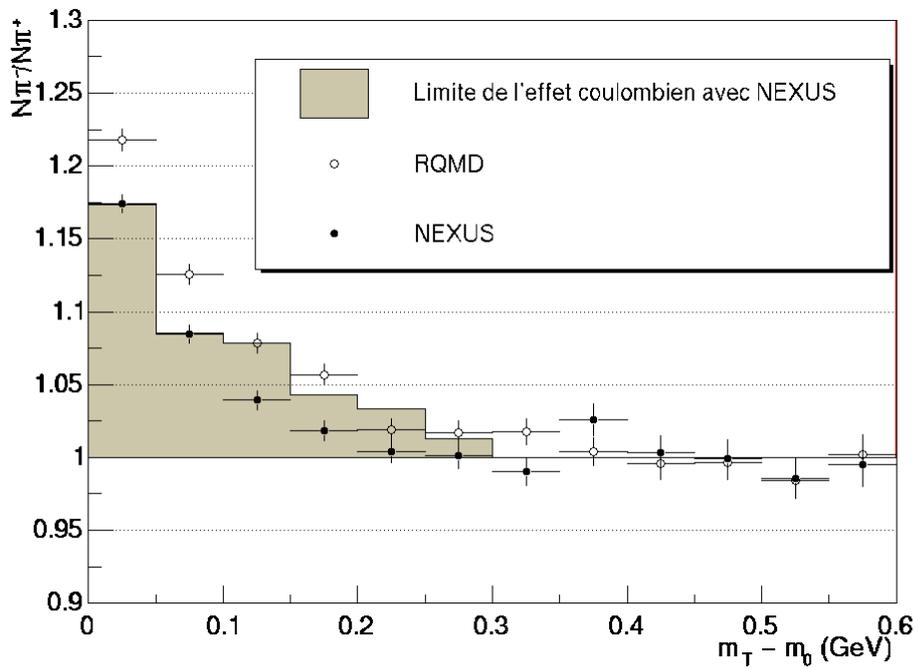


Figure 5.9 Impact de l'interaction coulombienne sur le rapport, en fonction de m_T . Les prédictions des modèles obtenues à l'aide du calcul classique de l'interaction coulombienne sont comparées avec la zone permise par les données après correction de la désintégration des hyperons étranges

Le modèle NEXUS se situe à la limite de la zone permise extraite des données. En

revanche, RQMD surestime l'effet de l'interaction coulombienne sur le rapport. Il traite donc de nouveau la dynamique de la collision de manière inadéquate. Cependant, il est nécessaire de noter que la différence entre les deux modèles NEXUS et RQMD est faible compte tenu du fait que la prise en compte de la désintégration des hypérons étranges est imprécise. De plus, il est important de rappeler que les deux modèles tendent à surestimer le nombre de protons en excès présents au niveau de la rapidité du centre de masse. L'impact de l'interaction coulombienne devrait donc être surestimé par les deux modèles.

5.3 Conclusions

A partir de l'étude des modèles RQMD et NEXUS, nous avons montré que les pions sont issus en très grande majorité de processus hadroniques et en particulier de la désintégration de résonances. Toutefois, une modélisation des zones de hautes densités d'énergie est incluse dans NEXUS sous la forme de gouttelettes de quarks. Ces objets s'apparentent au plasma de quarks et de gluons en ce sens qu'ils permettent de décrire de l'évolution du système lorsque la densité d'énergie est trop importante pour rendre pertinente une description en terme hadronique. Nous avons montré que la présence de ces gouttelettes introduit un retard de l'émission des pions dans NEXUS par rapport à RQMD. Ce phénomène se traduit par une différence mesurable de l'impact de l'interaction coulombienne sur le rapport π^- sur π^+ en fonction de la masse transverse. Nous avons de plus constaté que RQMD prédit une corrélation moins importante que NEXUS entre les pions positifs et négatifs ce qui implique que la distance entre les pions au moment de leur création est plus faible dans NEXUS que dans RQMD. Cette seconde différence ne peut être reliée directement à la présence des gouttelettes car l'ensemble de l'évolution dynamique du système influe sur la fonction de corrélation.

L'étude de nos données a montré que l'interaction coulombienne n'était pas le seul phénomène à introduire une asymétrie du nombre de π^- par rapport à celui des π^+ à basse masse transverse. La désintégration des hypérons étranges y contribue en effet, de manière importante. La prise en compte de cet effet introduit des erreurs systématiques importantes car le taux de production des particules étranges n'est pas précisément contraint expérimentalement. Cependant, l'utilisation des modèles RQMD et NEXUS nous a permis de quantifier cette contribution.

Nous avons constaté que lorsque les contributions de l'interaction coulombienne et de la désintégration des hypérons étranges sont ajoutées, le modèle NEXUS reproduit les données alors que RQMD les surestime. Nous avons de plus, comparer les données corrigées de la désintégration des hypérons étranges avec les prédictions des modèles en ne prenant en compte que l'interaction coulombienne. De nouveau, NEXUS est en accord avec les données alors que RQMD les surestime. L'étude de la fonction de corrélation π^- – π^+ nous a conduit à tirer une conclusion similaire : NEXUS reproduit la fonction de corrélation expérimentale alors que RQMD la sous-estime. Le modèle NEXUS est donc en accord avec les mesures liées à la dynamique de la collision que nous avons effectuées au contraire de RQMD. La présence des gouttelettes de quarks explique pourquoi NEXUS reproduit les données en ce qui concerne le rapport π^- sur π^+ en fonction de m_T . Il est en

effet nécessaire d'introduire un effet qui limite l'émission des pions pendant les 15 premiers fm/c de la collision pour reproduire ce rapport.

Les erreurs systématiques sur nos mesures sont importantes en particulier l'estimation de la contribution de la désintégration des hyperons étranges. Pour les réduire, il serait nécessaire de pouvoir rejeter expérimentalement les pions issus d'hyperons étranges ce qui pourrait être effectué en identifiant précisément le point provenance des particules. En effet, les hyperons étranges se désintègrent à plusieurs centimètres du point de collision initial. Cette méthode de réjection pourrait être réalisée par la collaboration NA49.

L'étude de la dynamique de production d'autres particules, en particulier des protons et des kaons devrait apporter des informations essentielles. De plus, la mise en évidence de différence dans l'émission de différents types de particules à partir de la construction de leur fonction de corrélation pourrait s'avérer être un outil efficace pour apporter de nouvelles contraintes aux modèles. La figure 5.10 montre les temps d'émission des pions, kaons et protons extrait des deux modèles NEXUS et RQMD. Les différentes particules présentent des comportements différents qui sont mesurables expérimentalement grâce à la construction des fonctions de corrélation. Les rapports des spectres en masse transverse des protons et kaons devraient permettre de tirer les mêmes conclusions que pour les pions car NEXUS prédit une émission de particules moins importante pendant les premiers 15 fm/c que RQMD. L'étude de la dynamique de l'émission de ces différents types de particules devrait donc permettre de vérifier les résultats que nous avons obtenus à partir de l'étude des pions.

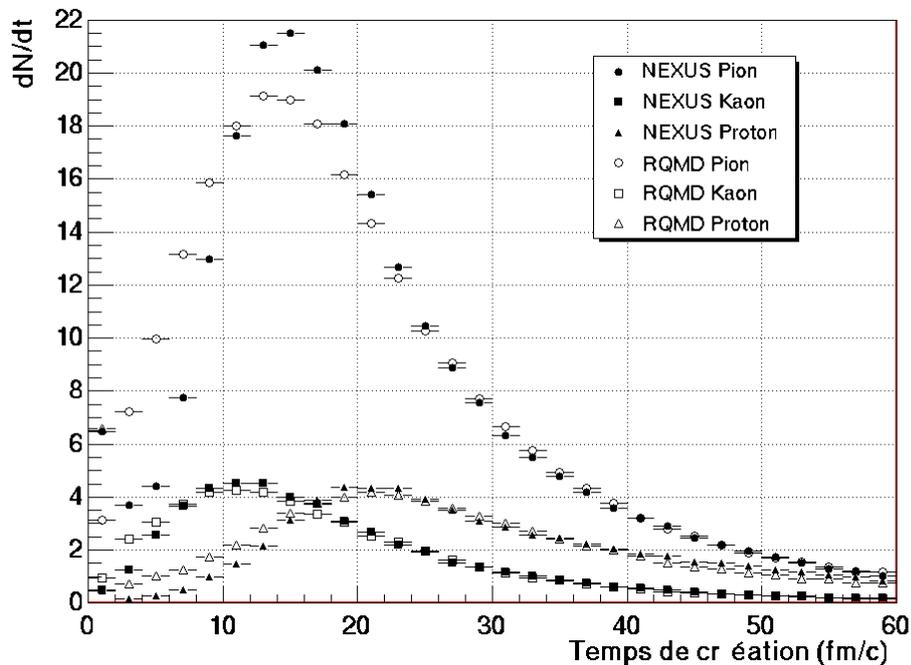


Figure 5.10 Temps de création des pions, kaons et protons dans les modèles NEXUS et RQMD.